

На правах рукописи

Попова Мария Артемьевна

**РОЛЬ АЛЮМИНИДОВ И СИЛИЦИДОВ В ФОРМИРОВАНИИ
СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ТИТАНА**

Специальность 05.16.01 –
«Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена на кафедре «Термообработка и физика металлов»
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н.Ельцина»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент Демаков Сергей Леонидович

Официальные оппоненты:

Салищев Геннадий Алексеевич, доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный
исследовательский институт», руководитель лаборатории объемных
наноструктурных материалов

Мамонов Андрей Михайлович, доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «МАТИ-Российский государственный технологический
университет имени К.Э. Циолковского», профессор
кафедры «Материаловедение и технология обработки материалов»

Ведущая организация:

ФГБУН Институт физики металлов Уральского отделения Российской
академии наук, г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится «**20**» **декабря 2013** г. в **15⁰⁰** на заседании
диссертационного совета Д 212.285.04 на базе в ФГАОУ ВПО «Уральский
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»
по адресу: 620002, г. Екатеринбург, К-2, ул. Мира, 28, в аудитории МТ-329,
Институт материаловедения и металлургии.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО
«УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Автореферат разослан «20» ноября 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.285.04

Л.А. Мальцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Титановые сплавы благодаря своим высоким характеристикам удельной прочности, удельной жаропрочности и коррозионной стойкости находят все большее использование в изделиях и конструкциях, применяемых в авиакосмической промышленности. При этом повышающиеся требования конструкторов к свойствам материалов обуславливает необходимость проведения исследований по созданию новых сплавов и режимов их обработки, которые способны обеспечить требуемый комплекс физико-механических свойств в изделиях новой техники.

В частности, использование жаропрочных титановых сплавов в особо ответственных деталях газотурбинных двигателей авиационной техники (дисков, лопаток, деталей компрессора и пр.), работающих при повышенных температурах 550...600 °С, приводит к строгой необходимости выполнения главного критерия качества полуфабрикатов – проработке их структуры, лишь при строгой регламентации которой возможно получение повышенного комплекса механических свойств. Поэтому полный цикл термической обработки изделий должен быть основан на глубоком понимании процессов структурообразования, протекающих на каждом отдельном его этапе.

На сегодняшний день общепринято, что повышенные жаропрочные свойства достигаются у титановых сплавов с пластинчатой структурой, созданной обработкой в высокотемпературной β -области. Обычно при назначении режимов термической обработки наибольшее внимание уделяется основным фазам α и β , их количественному соотношению и морфологии, в то время как в процессе охлаждения из β -области и при последующих циклах термической обработки в сплавах возможны выделения различных третьих фаз – алюминидов и силицидов, от характера распределения которых, их типа и количества могут существенно меняться свойства материала. В последнем случае необходимо учитывать возможное

влияние на процесс выделения одной из интерметаллидных фаз выделение другой, что связано с возможностью частичной замены алюминииом атомов кремния в силицидах. Получение новых знаний по этим вопросам является актуальным как с научной, так и с практической стороны, так как позволяет более точно оценивать роль интерметаллидных фаз в формировании структуры и свойств жаропрочных сплавов титана.

Работа выполнена в соответствии с основными направлениями научной деятельности кафедры «Термообработка и физика металлов» ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (тема №2218, проект №2.1.2/7175); федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракты №02.740.11.160, №02.740.11.0537); государственного задания №3.829.2011 «Теоретическое и экспериментальное исследование перспективных конструкционных сплавов и функциональных материалов с интерметаллидами».

Целью настоящей работы являлось изучение влияния выделения силицидов и алюминидов на формирование структуры и свойств жаропрочных псевдо- α - и малолегированных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов.

В работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Исследовать процессы старения в сплавах с повышенным содержанием алюминия (7...8 %) и определить типы выделяющихся частиц и их роль в формировании свойств.
2. Оценить влияние неоднородности состава сплавов с пластинчатой структурой на процессы распада метастабильных фаз.
3. На примере промышленного псевдо- α -титанового сплава рассмотреть различные режимы обработки для формирования повышенного комплекса служебных свойств.

Научная новизна работы

1. Впервые экспериментально подтверждено, что в зависимости от температурно-временных параметров термической обработки в жаропрочных титановых сплавах с алюминиевым эквивалентом $[Al]_{\text{экв}} = 8 \dots 10,25$ возможна смена механизма образования упорядоченной фазы Ti_3Al . Так, при относительно низких температурах старения ($500\text{ }^{\circ}C$) образование алюминида титана происходит по гомогенному механизму, который при повышении температуры меняется на гетерогенный.

2. Показано, что в процессе старения сплавов с неоднородным химическим составом α -фазы, созданным кратковременной обработкой в однофазной β -области, формируется более высокий комплекс механических свойств, чем в случае аналогичного старения сплава с исходно однородной структурой.

3. Установлено, что в зависимости от параметров термической обработки сплавов с пластинчатой структурой возможно выделение силицидных частиц трех различных типов S_1 , S_2 и S_3 . При низких температурах старения ($600\text{ }^{\circ}C$) происходит выделение силицидов $(Ti,Zr)_5Si_3$ на межфазных α/β -границах. С увеличением температуры старения в результате обогащения силицидов S_1 атомами циркония возможна их трансформация в силициды $(Ti,Zr)_6Si_3$ (S_2) и $(Zr,Ti)_2Si$ (S_3), которые расположены как на межфазных границах раздела, так и в пластинах α -фазы. При этом возможно сосуществование силицидов S_2 и S_3 .

4. Обнаружено, что в процессе старения при $600 \dots 700\text{ }^{\circ}C$ происходит глобуляризация тонких прослоек β -фазы, которая способствует повышению характеристик пластичности сплавов.

Практическая значимость

Показано, что для повышения пластических характеристик жаропрочных сплавов с $(\alpha+\alpha_2)$ -структурой необходимо осуществлять

выделение α_2 -фазы по гомогенному механизму, реализация которого возможна в сплавах с повышенным содержанием алюминия. В связи с этим, для промышленных псевдо- α -сплавов титана предложено иметь содержание алюминия на верхнем пределе марки. В то же время, для снижения объемной доли выделяющихся силицидных частиц рекомендовано содержание кремния и циркония на нижнем пределе.

Результаты работы используются при корректировке составов и режимов термической обработки жаропрочных сплавов титана на предприятии ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты

1. Влияние неравновесности состава, созданного кратковременной выдержкой в однофазной области, на процессы упорядочения, протекающие в псевдо- α -, а также в малолегированных ($\alpha+\beta$)-сплавах титана.
2. Влияние температурно-временных параметров обработки на типы и характер выделения силицидных частиц в жаропрочных титановых сплавах.
3. Влияние выделения интерметаллидных фаз на механические свойства сплавов.
4. Процесс глобуляризации β -фазы при старении.

Апробация работы

Материалы диссертации были доложены и обсуждены на 16 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе: XI – XIV Международной Уральской школе-семинаре металловедов – молодых ученых (Екатеринбург, 2010-2013 гг.), XIX – XXI Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (2008, 2010, 2012 гг.), I и III Всероссийской школы-конференции Молодых учёных «Современные проблемы металловедения» (Абхазия, Пицунда, 2009, 2013 гг.),

V и VI Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» (Москва, 2010, 2012 гг.), XVIII Международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники (Екатеринбург, 2010 г.), The 12th World Conference on Titanium (Beijing, China 2011 г.), Международной научной школе для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов» (Екатеринбург, 2012 г.), а также на международных конференциях «Титан в СНГ» (2007, 2009, 2012, 2013 гг.).

Публикации

По материалам исследования опубликованы 24 печатные работы, отражающие основное содержание диссертации, 7 из них в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов по работе, библиографического списка из 98 наименований; изложена на 131 странице, включает 72 рисунка, 11 таблиц.

Автор выражает благодарность научному сотруднику Института физики металлов УрО РАН Елкиной Ольге Аркадьевне за помощь в проведении электронномикроскопических исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена актуальность выбранной темы исследования, сформулированы общие цели и направления работы.

В **первой главе** проведен аналитический обзор литературы по исследуемой проблеме. Проанализированы принципы легирования жаропрочных титановых сплавов, рассмотрено влияние термообработки на формирование структуры. Обобщены данные о процессах упорядочения,

протекающих в псевдо- α -сплавах, а также в малолегированных ($\alpha+\beta$)-сплавах титана. Проведен анализ выделения частиц силицидов в различных титановых сплавах. Показаны типы и характер выделения силицидов в зависимости от состава сплава и режимов термической обработки.

Сформулирована цель работы и поставлены задачи исследования.

Во **второй главе** представлено описание исследуемых материалов, схем термических обработок и методик исследования. Материалом исследования служили полуфабрикаты из опытных жаропрочных титановых сплавов, химический состав которых приведен в таблице 1.

Таблица 1.

Химический состав исследуемых полуфабрикатов

Условный № сплава	Массовая доля элементов, масс. %							Алюминиевый эквивалент, масс. %
	Al	Sn	Zr	Mo	Nb	Si	Fe	
Сплав 1	7	4	7	0,5	0,5	0,1	-	10
Сплав 2	8,3	-	2,2	2,1	-	0,25	0,15	10,25
Сплав 3 (Типа ВТ 18 У)	6,5	2,5	4	0,7	1	0,15	-	8,5

На первом этапе работы при анализе выделения интерметаллидных фаз в ходе старения полуфабрикаты из сплава 2 с исходной глобулярной структурой нагревали в β -область с выдержкой 1 час, а затем охлаждали на воздухе. Старение проводили при температурах 500...750 °С с шагом 50 °С с выдержками до 85 часов в лабораторных муфельных печах.

На втором этапе работы исследовали влияние неравновесности состава на формирование структуры и свойств при последующем старении. Прутки из сплава 2 нагревали в β -область на температуру 1100 °С с выдержками 10 и 60 минут, а затем охлаждали на воздухе. Для нагрева в однофазную область

прутков из сплава 1 использовали электроконтактный нагрев до температуры 1150 °С с выдержкой 30 секунд и охлаждением на воздухе. Старение исследуемых полуфабрикатов проводили при температурах 500...750 °С с шагом 50 °С с выдержками до 100 часов в лабораторных муфельных печах.

На заключительном этапе работы исследование проводили на промышленном сплаве ВТ 18У, а также на аналогичном сплаве с повышенным содержанием легирующих элементов (Al, Zr, Sn) в пределах марочного состава. Температуры нагрева составили 900, 940 °С (в двухфазной области) и 1100 °С (в однофазной β -области), время изотермической выдержки 1 час с последующим охлаждением на воздухе. Старение проводили при температурах 500...750 °С с шагом 50 °С с выдержками 10 и 25 часов в лабораторных муфельных печах.

Термический анализ проводили на приборе синхронного термического анализа STA 449 C Jupiter методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Исследование микроструктуры сплава осуществляли методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на приборах Philips 535 и JSM6490LV и методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопах JEM 2100 и JEM 200CX. Измерение твердости по Виккерсу проводили с помощью прибора MHTX CSM Instruments по методике Оливера и Фарра при нагрузке 9Н. Рентгеноструктурный фазовый анализ (РСФА) осуществляли на дифрактометре Bruker D8 Advance в K_{α} медном излучении с применением энергодисперсионного детектора и щелей Соллера.

Испытания механических свойств на растяжение были выполнены на машине Instron 3382 на пятикратных образцах при комнатной температуре по ГОСТу 1497.

В третьей главе изучено влияние различных режимов старения на выделение силицидов и алюминидов в малолегированном по β -стабилизаторам ($\alpha+\beta$)-титановом сплаве Ti-8,3Al-2,2Zr-2,1Mo-0,2Si-0,15Fe (сплав 2).

С помощью метода дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) были проанализированы тепловые эффекты, наблюдающиеся при непрерывном нагреве до 1100 °С деформированных полуфабрикатов и обусловленные распадом твердых растворов метастабильных фаз. В ходе анализа полученных результатов были выбраны следующие режимы старения: нагрев до температур 500...750 °С с шагом 50 °С и выдержками 10, 25 и 85 часов.

Показано, что распад высокотемпературной β -фазы при всех изученных температурах старения (500...750 °С) сопровождается образованием α_2 -фазы, дисперсные частицы которой фиксируются при температурах 650...700 °С (рисунок 1). При более низких температурах старения частиц алюминида титана не обнаружено, но на электронограммах присутствуют четкие рефлексы α_2 -фазы. Наличие в сплаве алюминида титана при всех исследованных режимах упрочняющей обработки подтверждается данными рентгеноструктурного фазового анализа.

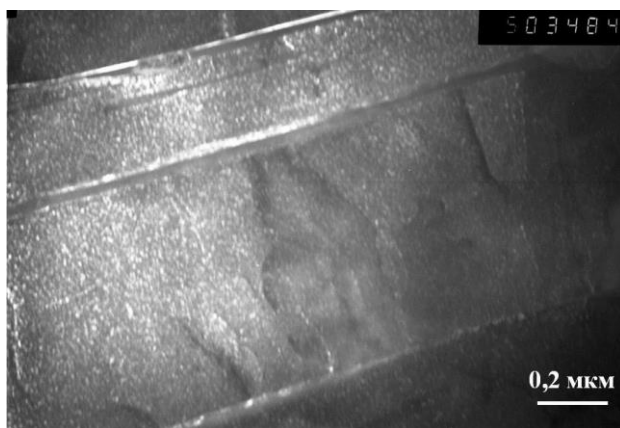
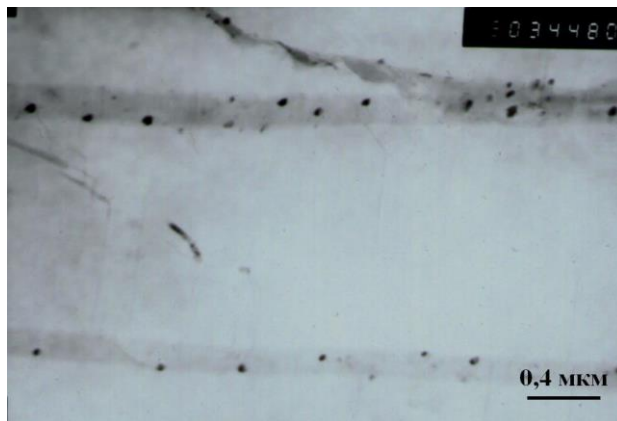


Рисунок 1. Алюминидные частицы в сплаве 2 после высокотемпературной обработки и старения при 700 °С в течение 10 часов (темнопольное изображение в рефлексе $(011)_{\alpha_2}$)

Установлено, что в зависимости от температурно-временных параметров обработки в сплаве возможно выделение силицидных частиц трех различных типов S_1 , S_2 и S_3 . При относительно низких температурах старения (600 °С)

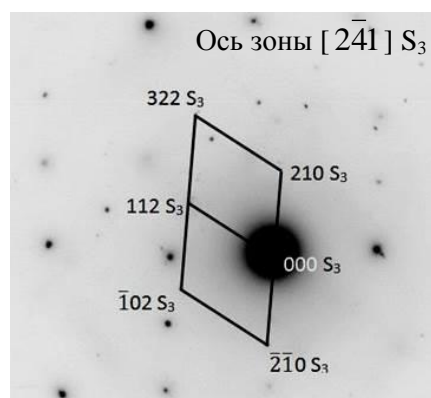
на межфазных α/β -границах происходит выделение силицидов $(\text{Ti,Zr})_5\text{Si}_3$ (силицид S_1), имеющих гексагональную кристаллическую решетку с параметрами $a = 0,78$ нм, $c = 0,54$ нм (рисунок 2 а).



а



б



в

Рисунок 2. Силицидные частицы в сплаве 2 после высокотемпературной обработки и старения: а – при 600 °С в течение 25 часов (светлопольное изображение); б – при 700 °С в течение 10 часов (темнопольное изображение в рефлексе $(112)S_3$); в – электронограмма с «б» и схема ее расшифровки

Обнаружено, что с увеличением температуры старения в результате обогащения силицидов S_1 атомами циркония возможна их трансформация в силициды $(\text{Ti,Zr})_6\text{Si}_3$ (S_2) с гексагональной решеткой с параметрами $a = 0,70$ нм, $c = 0,36$ нм и $(\text{Zr,Ti})_2\text{Si}$ (S_3) с тетрагональной кристаллической решеткой (структурный тип $C16$) с параметрами $a = 0,65$ нм, $c = 0,52$ нм (рисунок 2 б). Выделяющиеся частицы располагаются как на межфазных α/β -границах, так и в пластинах α -фазы.

Показано, что в процессе старения наблюдается некоторое упрочнение сплава, которое наиболее ярко проявляется при температурах 600...700 °С при существенной потере пластичности. Повышение температуры старения до 750 °С способствует росту пластичности вследствие коагуляции частиц α_2 -фазы, при этом прочностные характеристики умеренно понижаются.

В четвертой главе изучали влияние неравновесности состава β -фазы за счет сокращения времени нагрева и времени выдержки при температурах β -области на процессы распада.

Установлено, что выдержка в течение 10 минут в однофазной области не приводит к формированию однородного β -твердого раствора и при охлаждении формируется целый спектр структур, которые отличаются по составу фаз и по морфологии структурных составляющих.

Обнаружено, что в случае исходной неравновесной структуры, созданной кратковременной обработкой в β -области и последующим охлаждением на воздухе, при относительно низких температурах старения (500...600 °С) в пересыщенном α -твердом растворе происходит гомогенное превращение и образование упорядоченных относительно крупных областей α_2 -фазы. Об этом свидетельствует присутствие антифазных границ в структуре (рисунок 3). В сплаве 2 с повышенным содержанием алюминия антифазные границы наблюдали и при более высоких температурах старения (рисунок 4).

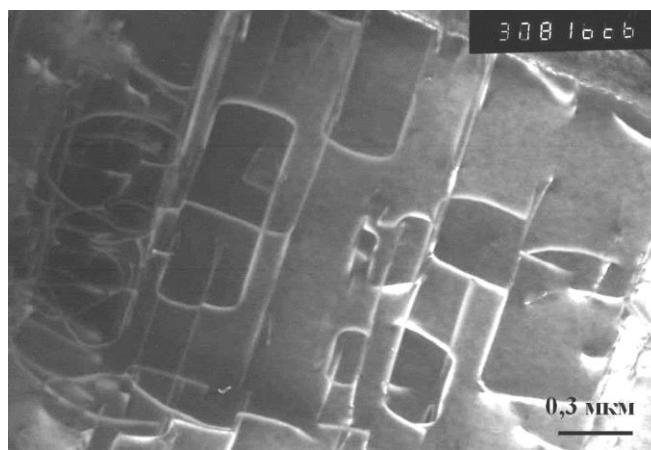
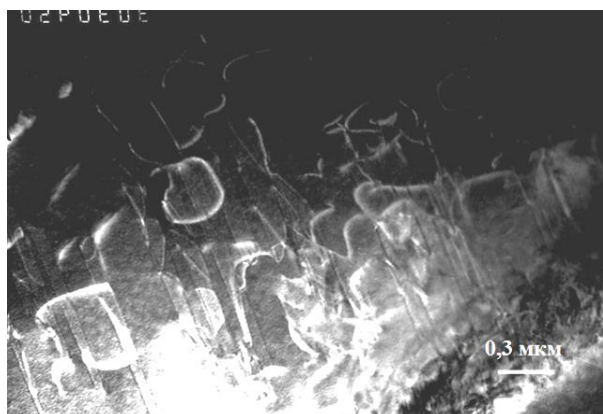
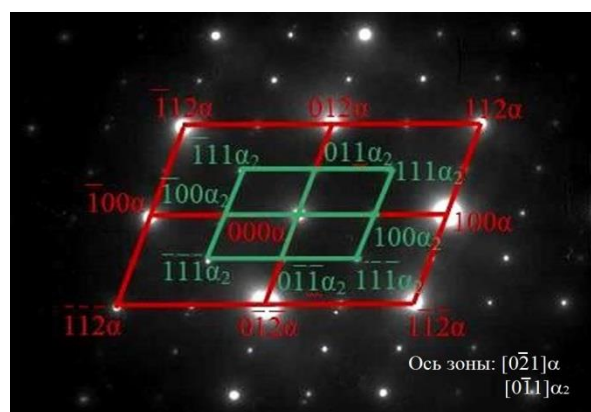


Рисунок 3. Микроструктура сплава 1 после электроконтактного нагрева в β -область и старения при 500 °С в течение 100 часов (темнопольное изображение в рефлексе $(110)\alpha_2$)



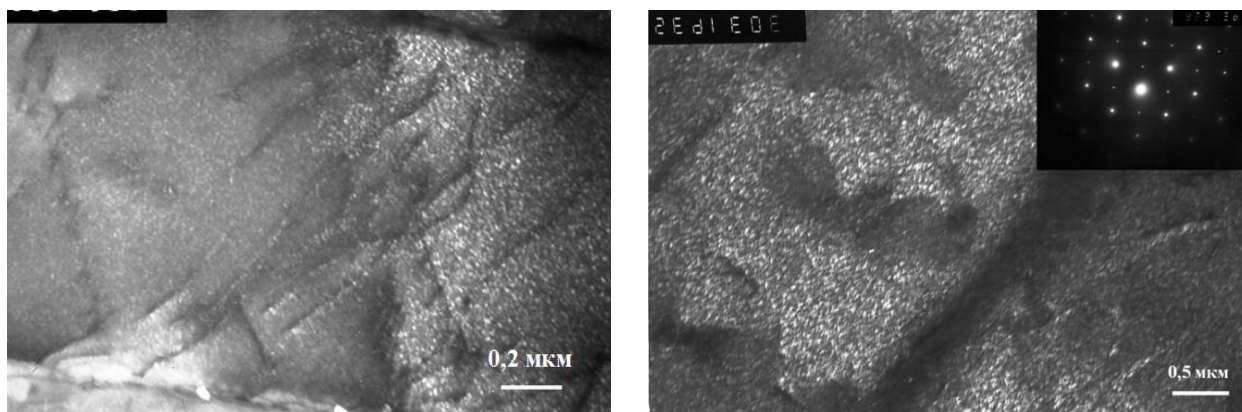
а



б

Рисунок 4. Микроструктура сплава 2 после кратковременной выдержки в β -области и старения при 650 °С в течение 10 часов:
а – темнопольное изображение в рефлексе $(100)\alpha_2$;
б – электронограмма с «а» и схема ее расшифровки

Показано, что в зависимости от состава сплава повышение температуры старения до 650...700 °С приводит к смене механизма превращения, и зарождение упорядоченной фазы происходит по гетерогенному механизму. При этом в структуре наблюдаются дисперсные частицы α_2 -фазы (рисунок 5).



а

б

Рисунок 5. Микроструктура сплавов после кратковременной выдержки в однофазной области и старения (темнопольные изображения в рефлексе $(011)\alpha_2$):

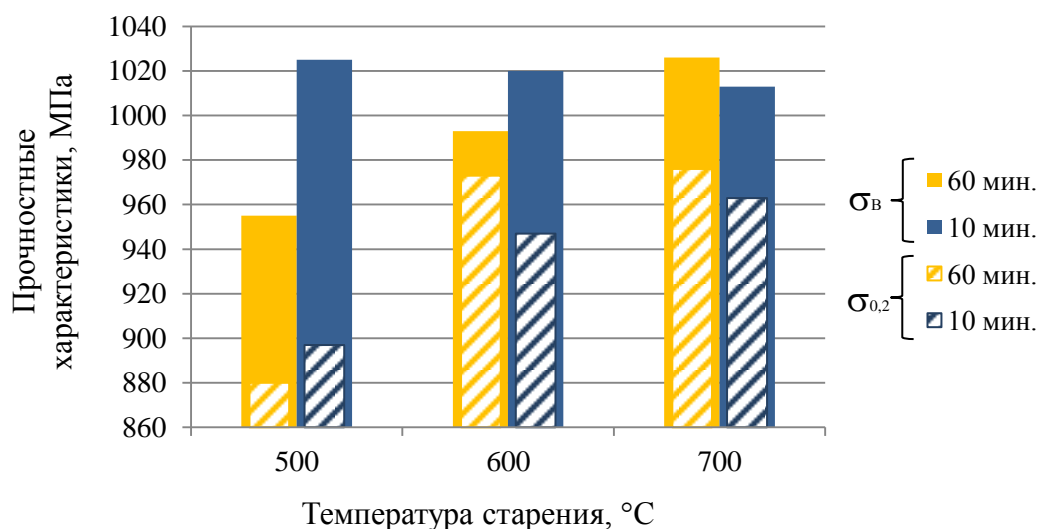
а – сплав 1 после старения при 650 °С в течение 25 часов;

б – сплав 2 после старения при 700 °С в течение 25 часов

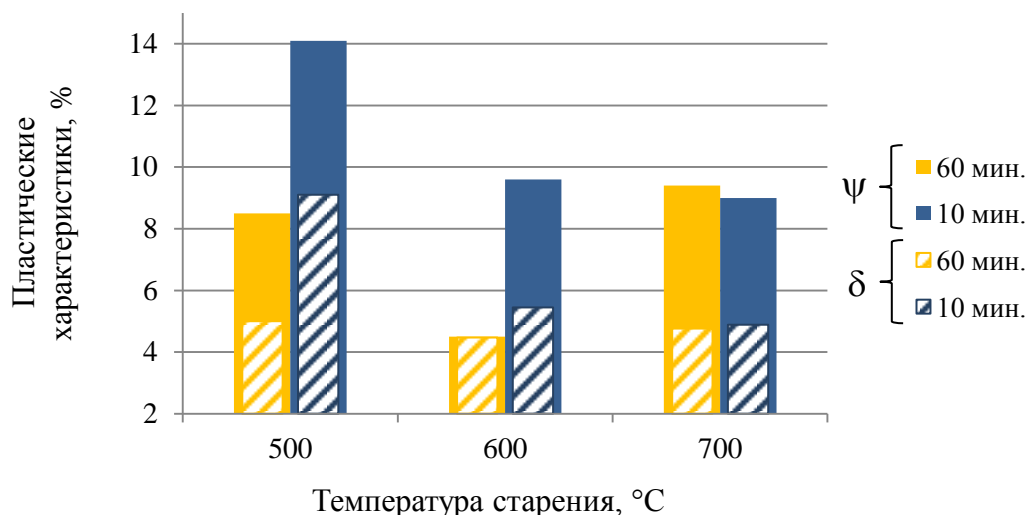
Увеличение продолжительности выдержки при обработке в β -области от 10 минут до 1 часа способствует смещению температурно-временных интервалов выделения силицидных частиц в большую сторону: начало выделения силицидов S_1 в сплаве, испытывшем кратковременную выдержку в β -области, зафиксировано после старения при 600 °С в течение 10 часов, тогда как в сплаве, испытывшем длительную выдержку в β -области, после старения при 600 °С в течение 25 часов, и более интенсивному распаду метастабильных фаз, приводя к более высокому уровню микротвердости ~ 425 МПа.

В процессе старения при рассматриваемых температурах наблюдали некоторый рост твердости сплавов. При этом прирост твердости сплавов с исходно более однородной структурой был больше и происходил более быстро, чем для сплавов, испытывших кратковременную выдержку в β -области. Отсутствие выделений частиц при старении позволяло предположить, что рост твердости в первую очередь обусловлен увеличением доли более прочной α -фазы и её твердорастворным упрочнением при распаде β -твердого раствора преимущественно атомами циркония.

Проведение механических испытаний сплава 2 после кратковременной выдержки в β -области и старения показало, что сплав обладает повышенными пластическими характеристиками по сравнению со сплавом, испытывавшим длительную выдержку в однофазной области при температурах старения 500...600 °С и примерно одинаковой пластичностью после старения при 700 °С (рисунок 6 б).



а



б

Рисунок 6. Результаты механических испытаний сплава 2 после различной выдержки в однофазной области и старения при разных температурах в течение 25 часов: а – прочностные характеристики;
б – пластические характеристики

При этом прочностные свойства сплава после старения на 500 °С выше, а на 600 °С временное сопротивление также больше, при меньшем значении предела текучести (рисунок 6 а). Большая разность значений σ_B , $\sigma_{0,2}$ в сплаве состаренном при 600 °С свидетельствует о большей склонности к деформационному упрочнению по сравнению со сплавом после длительной выдержки в однофазной области и, по нашему мнению, косвенно является следствием большего количества областей α_2 -фазы, образовавшихся по гомогенному механизму.

Повышение температуры старения при 700 °С приводит к смене механизма образования алюминида титана, и свойства выходят на один уровень вне зависимости от первоначальной обработки в однофазной области.

В пятой главе проведено изучение изменения режимов термической обработки для промышленного сплава ВТ 18У нескольких различных плавок, в которых варьировали содержание легирующих элементов в пределах марки сплава.

Обнаружено, что повышение температуры нагрева при высокотемпературной обработке сплава в ($\alpha+\beta$)-области (от 900 до 940 °С) активизирует процессы распада метастабильных фаз при последующем старении, и оказывается более благоприятной для рекомендации ее в качестве температуры первой ступени обработки сплава.

Вследствие высокой хрупкости сплава при наличии в нем дисперсных частиц α_2 -фазы, наиболее благоприятной для проведения последующего старения рекомендована температура нагрева, при которой выделение этой упорядоченной фазы происходит гомогенным путем (500...620 °С).

Варьирование доли легирующих элементов в сторону повышения α -стабилизаторов, таких как (Al, Sn) и нейтральных упрочнителей (Zr) и незначительного понижения β -стабилизаторов (Nb, Si), активизирует

выделение большей объемной доли интерметаллидных частиц при старении, о чем свидетельствует повышение интегральной интенсивности дифракционных линий, характерных для интерметаллидных фаз (рисунок 7). Это приводит к большему эффекту дисперсионного твердения сплава, способствуя формированию более высокого комплекса прочностных характеристик при удовлетворительной пластичности и вязкости (таблица 2).

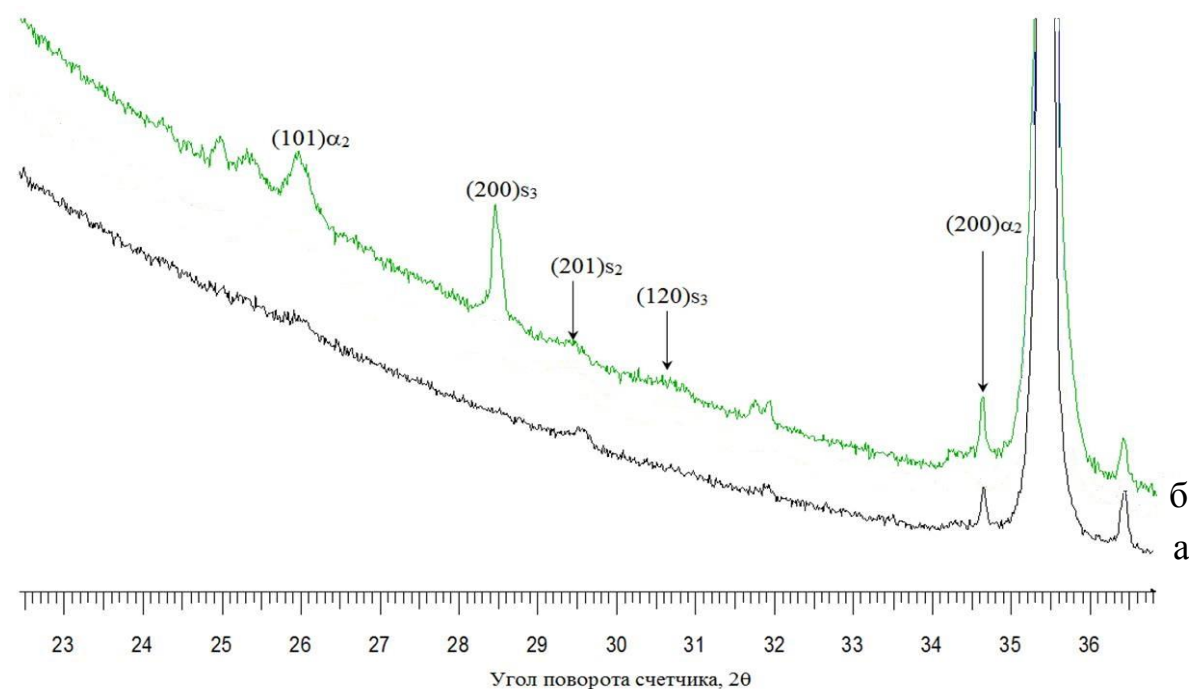


Рисунок 7. Участки дифрактограмм сплавов типа ВТ 18У, подвергнутых высокотемпературной обработке в β -области при 1100 °С в течение 1 часа с охлаждением на воздухе и последующему старению при 750 °С в течение 25 часов: а – сплав 3; б – сплав с повышенным содержанием легирующих элементов в пределах марки.

В сплаве с меньшим содержанием легирующих элементов при высоких температурах старения уменьшается объемная доля α_2 -фазы, вследствие активного образования силицидных частиц и обеднения твердого раствора по алюминию, что затрудняет процесс образования упорядоченной фазы.

Таблица 2.

Механические свойства сплавов

Сплав	Режим Термической обработки	Прочностные свойства, МПа		Пластические свойства, %		Ударная вязкость, Дж/см ²	
		$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	φ	КСУ	КСТ
Сплав 3	900 °С-1ч- 600-10ч	970	1070	7,0	11,0	22	5
	940 °С-1ч- 600-10ч	985	1100	5,0	9,0	28	7
Сплав 3 с повышенным содержанием Al, Zr, Sn	900 °С-1ч- 600-10ч	975	1100	6,8	9,0	22	3
	940 °С-1ч- 600-10ч	980	1130	6,4	8,0	25	5

С помощью микрорентгеноспектрального анализа на тонкой фольге был проведен химический анализ выделяющихся в сплаве частиц (рисунок 8, таблица 3). Исследование показало, что данные частицы значительно обогащены цирконием (26...30 масс. %) и кремнием (6,6...7,6 масс. %) по сравнению с микрообластями α -матрицы и β -прослойками, что дает право отнести данные частицы к силицидам, содержащим повышенное количество циркония.

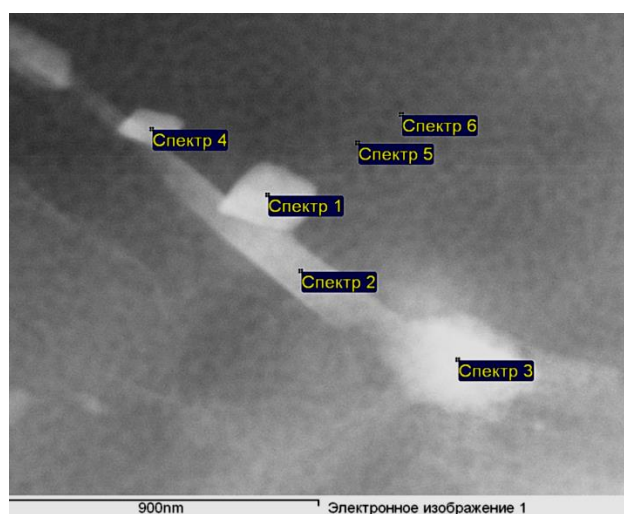


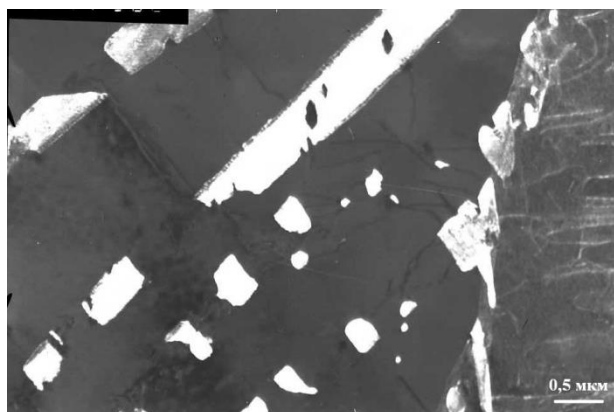
Рисунок 8. Области определения химического состава исследуемого сплава, подвергнутого высокотемпературной обработке при 1100 °С, последующему старению при 700 °С в течение 10 часов

Таблица 3.

Химический состав исследуемых областей тонкой фольги из сплава 3

Место съемки	Содержание основных элементов сплава, вес. %						
	Ti	Al	Zr	Si	Mo	Sn	Nb
Спектр 1	53,8	3,9	30,1	7,6	0,2	3,6	0,8
Спектр 2	76,6	5,1	3,5	0,02	7,9	3,8	3,1
Спектр 3	69,5	3,7	4,3	0,00	14,6	2,8	5,1
Спектр 4	56,8	4,0	26,1	6,6	1,5	3,1	1,9
Спектр 5	83,5	7,55	3,8	0,15	0,6	3,2	1,2
Спектр 6	82,2	7,6	3,6	0,5	1,3	3,4	1,4

С повышением температуры старения (особенно свыше 600 °С) наблюдается процесс глобуляризации β -фазы. Данный процесс заключается в нарушении сплошности β -прослоек в отдельных микрообъемах (рисунок 9), что приводит к их «дроблению».



а



б

Рисунок 9. Морфология β -фазы после старения при 600 °С:

а – темнопольное изображение структуры сплава в рефлексе (200) β ;

б – светловольное изображение структуры сплава

Механизм такого явления заключается в возникновении внутризеренных дефектов границ двойников, субзерен и зерен, последующем выходе этих границ на плоскую α/β -межфазную поверхность с образованием

тройных стыков границ неравновесной конфигурации, аналогично процессу глобуляризации α -фазы. Равновесие при этом достигается путем образования канавки на α/β -межфазной поверхности, выпуклой в сторону внутреннего дефекта, следствием чего является смена плоской границы на извилистую, последующее движение тройного стыка вдоль внутренней границы, деление β -пластин на отдельные частицы размеры которых пропорциональны размерам имеющейся ранее фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что в зависимости от состава сплава и температурно-временных параметров обработки в сплавах возможно выделение силицидных частиц трех различных типов S_1 , S_2 и S_3 . При низких температурах старения (до 600 °C) происходит выделение силицидов $(\text{Ti,Zr})_5\text{Si}_3$ на межфазных α/β -границах (силицид S_1). С увеличением температуры старения в результате обогащения силицидов S_1 атомами циркония возможна их трансформация в силициды $(\text{Ti,Zr})_6\text{Si}_3$ (S_2) и $(\text{Zr,Ti})_2\text{Si}$ (S_3), расположенных в пластинах α -фазы.
2. Показано, что в исследуемых сплавах при старении происходит выделение упорядоченной α_2 -фазы в интервале температур 500...750 °C. Установлено, что при низких температурах старения (500...600 °C) образование α_2 -фазы происходит в результате упорядочения отдельных микрообъемов по гомогенному механизму вследствие неоднородности исходного состояния с характерным образованием антифазных границ; повышение температуры старения до 700 °C способствуют активизации диффузионных процессов и образованию α_2 -фазы по механизму зарождения и роста.
3. Рассмотрено влияние выделения алюминидов и силицидов на механические свойства сплавов при старении и показано, что их образование

приводит к незначительному упрочнению, в то время как пластические характеристики при выделении дисперсных частиц α_2 -фазы резко понижаются, а наличие силицидных частиц на межфазных границах раздела способствует охрупчиванию сплавов.

4. Обнаружено, что в процессе старения при 600...700 °С происходит глобуляризация тонких прослоек β -фазы, которая способствует повышению пластичности сплавов.

5. Сделаны рекомендации по корректировке составов и режимов обработки псевдо- α -сплавов титана, и предложено иметь содержание алюминия на верхнем пределе при пониженном содержании кремния и циркония в пределах марочного состава для обеспечения выделения α_2 -фазы по гомогенному механизму при старении в интервале температур эксплуатации.

Основное содержание диссертации опубликовано в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. Гадеев Д.В. Использование метода термического анализа для определения температуры полного полиморфного превращения двухфазного титанового сплава / А.Г. Илларионов, А.А. Попов, М.А. Рыжков, Е.В. Колосова, М.А. Попова, П.С. Альтман, Н.Н. Бондарюк // Titan – 2010 – №1 – С.24-30.

2. Попов А.А. Процессы упорядочения в жаропрочных сплавах титана / Н.Г. Россина, М.А. Попова, А.В. Волков // Titan – 2011 – №1 – С.36-42.

3. Popov A.A. Ordering process in Heat-treatment Titanium alloys / N.G. Rossina, M.A. Popova // Proceeding of the 12th World Conference on Titanium – 2011 – P.350-353.

4. Попов А.А. Влияние способа термической обработки на формирование структуры и свойств жаропрочных сплавов титана / И.В. Нарыгина, М.А. Попова // Металловедение и термическая обработка металлов – 2012 – №12 – С.20-24.

5. Popov A.A. The effect of alloying on the ordering processes in near-alpha titanium alloys / N.G. Rossina, M.A. Popova // Materials Science and Engineering: A, Vol. 564 – 1 March 2013 – P.284-287.

6. Попов А.А. Выделение частиц силицидов в жаропрочных титановых сплавах / С.Л. Демаков, М.А. Попова, Н.Г. Россина, О.А. Елкина // Titan – 2013 – №1 – С.4-13.

7. Popov A.A. Effect of the method of heat treatment on formation of structure and properties of refractory titanium alloys / I.V. Narygina, M.A. Popova // Metal Science and Heat Treatment, Vol. 54, Nos. 11 – 12, P.633-637.

Другие публикации:

1. Попова М.А. Влияние легирования и термической обработки на структуру и свойства жаропрочных сплавов титана // Сборник трудов Всероссийской школы-конференции Молодых учёных «Современные проблемы металловедения» Абхазия, Пицунда: МИСИС, 2009. С 229-235.

2. Попов А.А. Фазовые и структурные превращения в сплавах титана / Н.Н. Россина, М.А. Попова // Сборник трудов XX Уральской школы металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов», Пермь, Екатеринбург, 2010. С.167.

3. Попова М.А. Изучение процессов, протекающих при термической термообработке жаропрочных титановых сплавов / И.В. Нарыгина // Сборник XII Международной научно-технической уральской школы-семинара металловедов – молодых ученых. Екатеринбург, 2011.С.285-287.

4. Попова М.А. Влияние легирования и термической обработки на структуру и свойства жаропрочных сплавов титана / Н.Г. Россина, С.Л. Демаков, А.А. Попов // Сборник XXI Уральской школы металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов». Магнитогорск, 2012. С.161-162.

5. Попова М.А. Влияние способа термической обработки на формирование структуры и свойств жаропрочных сплавов титана /

Н.Г. Россина // Сборник трудов VI Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» «ПРОСТ-2012», Москва, МИСиС, М., 2012, с.183.

6. Нарыгина И.В. Влияние упрочняющей термической обработки на формирование структуры и фазового состава жаропрочного титанового сплава / М.А. Попова, С.И. Степанов, Т.В. Латынцева// Сборник XIII Международной научно-технической уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых. Екатеринбург, 2012. С.395-398.

7. Нарыгина И.В. Влияние параметров высокотемпературной обработки на температурные интервалы распада метастабильных фаз при непрерывном нагреве жаропрочного титанового сплава / М.А. Попова, С.И. Степанов // Сборник Международной научной школы для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов. Екатеринбург, 2012. С.460-462.

8. Попова М.А. Влияние термической обработки на формирование интерметаллидных фаз в псевдо-альфа сплавах титана / И.В. Нарыгина, С.Л. Демаков // Сборник трудов III-й Всероссийской молодежной школы-конференции «Современные проблемы материаловедения» Абхазия. Пицунда, 2013. С. 78-83.

9. Попова М.А. Влияние параметров высокотемпературной обработки на механические свойства жаропрочного титанового сплава / И.В. Нарыгина, С.И. Степанов, К.И. Петрова // Сборник XIV Международной научно-технической уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых. Екатеринбург, 2013. С.288-290.

10. Попова М.А. Влияние микроструктуры на характер разрушения жаропрочного титанового сплава, подвергнутого упрочняющей термической обработке / И.В. Нарыгина, С.И. Степанов, Н.А. Попов, К.И. Петрова // Сборник XIV Международной научно-технической уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых. Екатеринбург, 2013. С.291-294.

Подписано в печать 19.11.2013 г. Объем – 1 п.л. Тираж – 100 экз. Заказ №

Ризография НИЧ УрФУ

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19